

**Определение энергетически эффективного закона механического воздействия при вибростабилизационной обработке металлических деталей****А. И. Шеремет, Н. В. Ивченков, Е. Ю. Ивченкова, Е. С. Шеремет**

Дослідження базується на методі вібростабілізаційної обробки, який використовується для зниження залишкових напружень в литих та зварних деталях та є альтернативою термдеформаційним методам, оскільки є невибагливим до маси, форми і габаритів деталі.

Зазвичай вібростабілізаційна обробка здійснюється за допомогою дебалансних електромеханічних систем, які є простими за конструкцією силової частини та системи керування. В таких системах обробка одночасно відбувається тільки на одній резонансній частоті. Оброблювана деталь, як правило, характеризується декількома резонансними частотами, що мають тенденцію до зміщення у низькочастотну область при здійсненні вібраційного впливу. Технологічний процес послідовної обробки на кожній змінюваній резонансній частоті є доволі тривалим у часі та не є ефективним з позиції витрат електричної енергії. З метою скорочення витрат часу та енергії, в роботі запропоновано використання найбільш прогресивних способів обробки відразу на декількох резонансних частотах. Виходячи з алгоритмів послідовної вібростабілізаційної обробки на декількох резонансних частотах деталі та їх зміни у бік низьких, запропоновано здійснення обробки полігармонічною збурюючою силою на обмеженій смузі частот. Цей вплив має таку ширину смуги частот, що містить усі можливі частоти деталі, на яких відбувається вібростабілізаційна обробка. Подібний вплив може бути реалізований за допомогою електродинамічного лінійного двигуна у якості виконавчого органу. Перевагою електродинамічного лінійного двигуна є пропорційність створюваного зусилля струму, що підводиться до рухомого провідника, і повторення його за формою.

Шляхом математичного моделювання для обраного прикладу встановлено, що звуження частотного діапазону в області низьких частот у 5 разів зменшує енергетичні витрати більш, ніж в 4000 разів у порівнянні з широкосмуговим законом механічної дії на деталь. Визначений теоретично енергетично ефективний закон може бути програмно реалізований у системах керування електродинамічними лінійними двигунами для здійснення вібростабілізаційної обробки

Ключові слова: вібростабілізаційна обробка, резонансна частота, енергетично ефективний закон, амплітудний спектр, електродинамічний лінійний двигун

## 1. Введение

Коробление базовых деталей и тел вращения (валы, шпиндели, шестерни и т. д.) приводит к преждевременной потере точности взаимного перемещения различных узлов машин в пространстве. В некоторых случаях это может привести к полной потере работоспособности машинами [1–3]. Изменение формы и размеров литых и сварных деталей вызвано остаточными внутренними напряжениями, возникающими в процессе неравномерного их остывания, а также при осуществлении механической обработки.

Для снижения остаточных напряжений и стабилизации геометрических размеров литых и сварных деталей применяют термдеформационные и деформационные методы.

Распространенные методы снижения остаточных напряжений базируются на тепловом и силовом факторах воздействия на металл и в зависимости от преобладающего фактора бывают двух основных типов [4] (рис. 1):

- методы, при которых деталь не подвергается значимым силовым воздействиям (естественное старение, отжиг);
- методы, при которых создается специальное силовое воздействие, выполняющее механическую стабилизационную обработку (виброобработка, статическое нагружение).

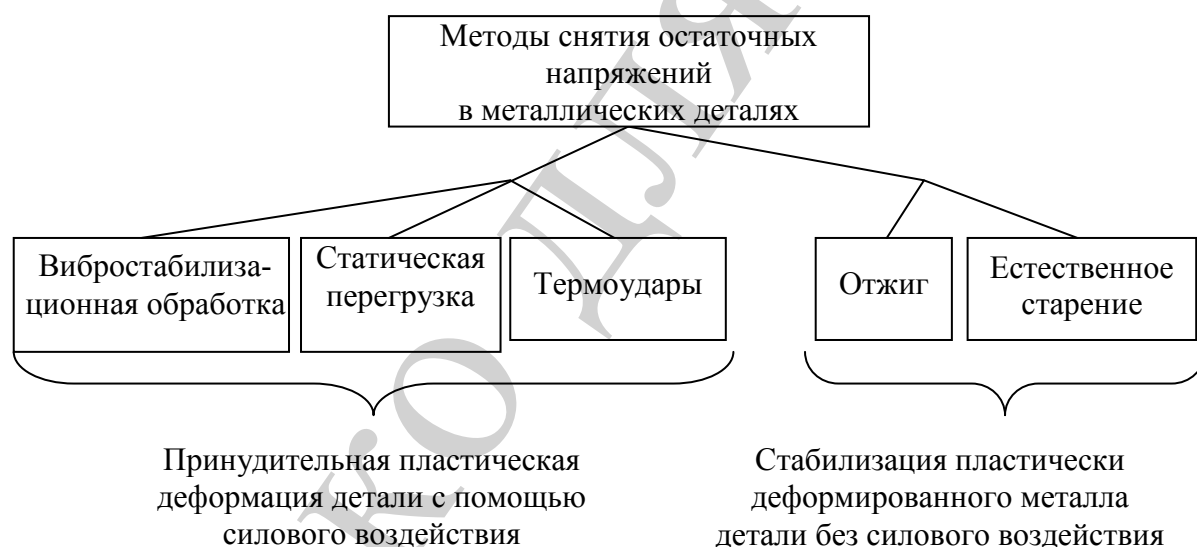


Рис. 1. Укрупненная классификация методов снятия остаточных напряжений

Метод динамического нагружения или метод вибрационной обработки заключается в воздействии на деталь механическими импульсами, формируемыми по определенному закону [4, 5]. От статической перегрузки он отличается тем, что нагружение и разгрузка детали проходят циклически, причем время выдержки в нагруженном состоянии невелико. Вибростабилизационная обработка вызывает суперпозицию напряжений, при которой в некоторый промежуток времени протекает локальная пластическая деформация металла. При этом остаточные напряжения, возникновение которых вызвано деформацией кристаллической решетки, снижаются

благодаря сообщению металлу некоторого энергетического импульса в процессе виброобработки [5].

В отличие от большинства методов снятия остаточных напряжений, вибростабилизационная обработка нетребовательна к массе, форме и габаритам детали, поэтому она является одним из самых универсальных способов снижения остаточных напряжений в литых и сварных деталях. Энергозатраты при осуществлении вибростабилизационной обработки на порядок ниже, чем при термообработке, поэтому совершенствование методов ее осуществления является актуальной научно-технической задачей.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Традиционно вибрационная обработка для снятия остаточных напряжений проводится на резонансных частотах детали или на частотах близких к резонансным, если обработка на резонансных частотах невозможна по каким-либо техническим причинам [6].

Основное преимущество вибростабилизационной обработки на резонансных частотах детали перед обработкой на частотах, отличных от резонансной, состоит в низком энергопотреблении на единицу массы. Такой подход дает возможность снимать внутренние напряжения в крупногабаритных и массивных деталях [7].

С позиций системного подхода установку для вибростабилизационной обработки можно представить в виде некоторой электромеханической системы, которая реализует алгоритм, позволяющий осуществлять требуемый способ обработки. При этом электромеханическая система для виброобработки может быть представлена в виде трех подсистем: управления, исполнительной, сопряжения. Исполнительная подсистема имеет такую конструкцию, которая позволяет ей обрабатывать задание, формируемое подсистемой управления и осуществлять обработку детали механическими импульсами заданной формы и продолжительности, идущими на резонансной частоте детали [8].

Большое распространение получили дебалансные электромеханические системы (рис. 2), рабочая часть которых состоит из платформы или виброизолирующих опор 2 для установки детали 1 и вибровозбудителя 3, прикрепляемого к детали струбцинами или болтами. В состав системы входит пульт управления с регистрирующими приборами 4 и вибродатчик 5 прикрепляемый к детали для получения информации о частоте и амплитуде колебаний. Например, в работе [9] подобная система применяется для виброобработки сварных швов.

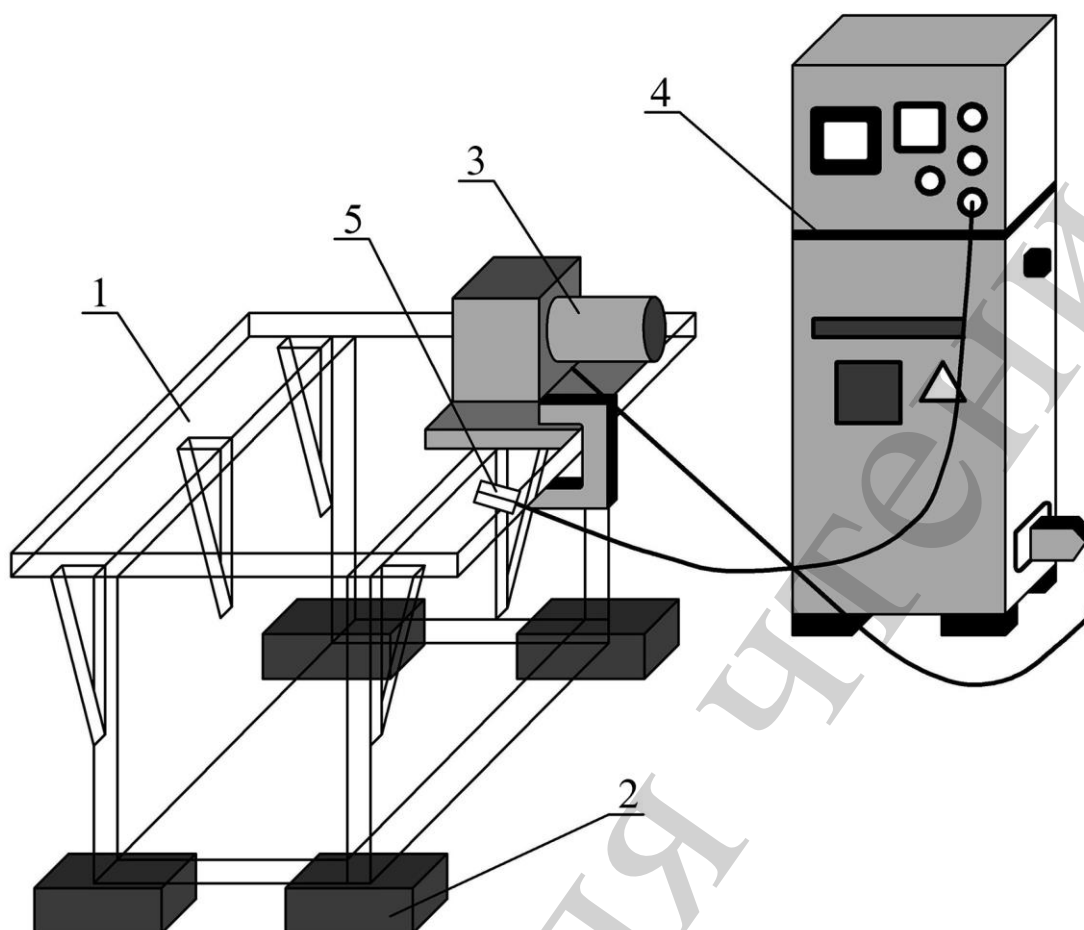


Рис. 2. Типовая схема дебалансной электромеханической вибросистемы:  
 1 – деталь; 2 – платформа или виброизолирующие опоры;  
 3 – вибровозбудитель; 4 – пульт управления; 5 – вибродатчик

В качестве исполнительного органа в дебалансных электромеханических системах выступает виброблок, состоящий из электропривода постоянного тока и нескольких дебалансов, устанавливаемых на валу [10].

Существенными недостатками способа виброобработки, реализуемого дебалансной электромеханической системой, являются:

1. Трудоемкий и длительный процесс поиска резонансных частот, поскольку для их нахождения необходимо с малым шагом менять частоту вращения электропривода постоянного тока.

2. Необходимость применения дорогостоящих высокоскоростных двигателей постоянного тока.

3. Смещение рабочей точки на нежесткой механической характеристике двигателя при входе в резонансный режим и выходе из него, что требует введения обратных связей в системе управления.

4. Ток двигателя, по изменению которого судят о течении процесса виброобработки, зависит от большого количества постоянных и переменных потерь в вибросистеме. На его величину и характер изменения также влияют способ установки детали, состояние крепления виброблока и другие факторы, не имеющие отношения к процессу виброобработки. Кроме того, процентное

изменение потребляемой мощности в процессе виброобработки небольшое и может быть сравнимо с погрешностью измерений.

5. Способ ограничен возможностями реализующей его вибросистемы: обработка ведется одновременно только на одной резонансной частоте, которая не может превышать 200 Гц.

6. Обработка проводится последовательно только на двух-трех частотах, тогда как детали сложной формы имеют гораздо больше значимых резонансных частот.

7. Увеличенное время и энергозатраты по причине обработки последовательно на каждой резонансной частоте.

8. Форма механических импульсов, воздействующих на деталь, определяется конструкцией дебаланса и не имеет возможности меняться динамично в процессе обработки. Для получения импульсов требуемой формы необходимо изготавливать специальный дебаланс, что влечет за собой дополнительные материальные затраты.

9. Способ не позволяет реализовать полигармоническую возмущающую силу для одновременной обработки на нескольких резонансных частотах.

10. Низкий уровень автоматизации процесса виброобработки: зачастую оператор вручную осуществляет вращение регулятора скорости двигателя, записывает резонансные точки и затем выставляет нужную частоту обработки.

Металлоконструкции малой жесткости могут подвергаться вибро-стабилизационной обработке на нерезонансных частотах. Тем не менее, такой способ вибростабилизации является технологически неэффективным и применяется только в ограниченных случаях [11].

Наиболее прогрессивными с позиции сокращения энергозатрат на возбуждение механических импульсов являются способы обработки сразу на нескольких резонансных частотах. Традиционно, как в способе, реализованном в работе [8], обработка ведется одновременно только на одной резонансной частоте, а в работе [9] – на двух.

В целом, в работах [5–7] и работах [8–10] не выполнялись исследования, связанные с оценкой непроизводительных энергозатрат, которые неизбежно возникают при неизменной форме и скважности импульсов во время обработки.

Таким образом, целесообразным является проведение исследования, посвященного энергоэффективности механического воздействия при вибро-стабилизационной обработке металлических деталей. Это, в конечном итоге, позволит решить задачу совершенствования методов вибростабилизационной обработки металлических деталей.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью исследования является определение эффективного закона механического воздействия при вибростабилизационной обработке металлических деталей, обеспечивающего снижение энергозатрат, сокращение времени обработки, повышение качества стабилизации размеров деталей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать способы механического воздействия, обеспечивающие одновременную вибростабилизационную обработку на полосе частот, содержащей резонансные частоты металлической детали;
- выполнить оценку энергетических потерь, возникающих при осуществлении вибростабилизационной обработки полигармоническим механическим воздействием на изменяемой полосе частот;
- выбрать исполнительный орган электромеханической системы, осуществляющей вибростабилизационную обработку.

#### **4. Исследование способов механического воздействия, обеспечивающих одновременную вибростабилизационную обработку на полосе частот**

Зачастую обрабатываемые детали имеют несколько резонансных частот. Кроме того, в процессе виброобработки уменьшается коэффициент жесткости, в связи с чем собственные частоты детали уходят в область низких. Поэтому в процессе виброобработки постоянно необходимо устанавливать значения собственных частот. Традиционно виброобработка ведется на всех частотах последовательно и этот процесс достаточно длителен во времени и имеет низкую энергоэффективность.

Рассмотрим вибростабилизационную обработку металлической детали гармоническим механическим сигналом вида

$$P(t) = P_0 e^{i\omega t}, \quad (1)$$

где  $P_0$  и  $\omega$  – амплитуда и круговая частота воздействия;  $i$  – мнимая единица.

Представим механическую систему вибростенда как линейную.

Для линейной механической системы с одной степенью свободы уравнение движения при гармоническом воздействии (1) можно представить в виде

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + \beta \frac{dz}{dt} + kz = P_0 e^{i\omega t}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса системы;  $\beta$  – коэффициент демпфирования;  $k$  – коэффициент жесткости;  $z$  – перемещение детали.

Для  $t > t_{\text{св}}$  решение уравнения (2) может быть представлено в виде

$$z(t) = P_0 e^{i(\omega t + \alpha)}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{св}}$  – время, за которое затухают свободные колебания системы;  $P_0$  – амплитуда вибровоздействия на деталь;  $\alpha$  – сдвиг фаз между силой и перемещением.

Амплитуда воздействий зависит от коэффициента расстройки по частоте

$$P_B = |z(t)| = \frac{z_{cm}}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + 4\delta^2 v^2}}, \quad (4)$$

где  $v = W/W_0$  – коэффициент расстройки по частоте;  $W_0 = \sqrt{k/m}$  – круговая собственная частота системы;  $z_{cm} = P_0/k$  – статическое смещение системы под воздействием силы  $P_0$ ;  $\delta = \beta/2m$  – коэффициент вязкого демпфирования.

Из (4) определяется коэффициент динамического усилия

$$k_d = \frac{P_B}{z_{cm}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + 4\delta^2 v^2}}. \quad (5)$$

Для  $v=1$ , т. е. при резонансе, коэффициент динамического усилия в зависимости от коэффициента демпфирования может принимать значения от 0,5 до 5 и более. Поэтому при гармоническом воздействии виброобработку ведут на частотах, равных резонансным.

Зачастую обрабатываемые детали имеют несколько резонансных частот, кроме того, в процессе виброобработки уменьшается коэффициент жесткости, в связи с чем собственные частоты детали  $\omega_{0i}$  уходят в область низких. Поэтому в процессе виброобработки постоянно необходимо устанавливать значения собственных частот. Традиционно виброобработка ведется на всех частотах  $\omega_{0i}$  последовательно и этот процесс достаточно длителен во времени и технически трудно реализуем. Поэтому возникает задача виброобработки одновременно на всех частотах в частотном диапазоне

$$\Delta\omega = \omega_{0\max} - \omega_{0\min}, \quad (6)$$

где  $\omega_{0\max}$  – максимально возможная собственная частота детали до виброобработки;  $\omega_{0\min}$  – минимальная собственная частота детали после виброобработки.

Таким образом, воздействие механическими импульсами представляет собой полигармоническую возмущающую силу. Если колебательная система линейна, то суммарный эффект от действия полигармонической возмущающей силы, представленной рядом Фурье (7), будет выражаться суммой частных эффектов от действия каждой из гармоник:

$$P(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)), \quad (7)$$

где  $\omega_n = n\omega$  – частота гармоник;  $\omega = 2\pi/T$  – круговая частота первой гармоники.

В общем случае энергетически оптимальный амплитудный спектр при одновременной вибростабилизационной обработке на всех «плавающих» собственных частотах детали может быть представлен в виде

$$S(\omega) = \begin{cases} S_0, \omega_{0\min} \leq \omega \leq \omega_{0\max}, \\ 0, \omega_{0\max} < \omega < \omega_{0\min}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $S_0$  – амплитуда всех гармоник в частотной области  $\omega$ .

График этого спектра, сплошного в интервале от  $\omega_{0\min}$  до  $\omega_{0\max}$ , представлен на рис. 3.

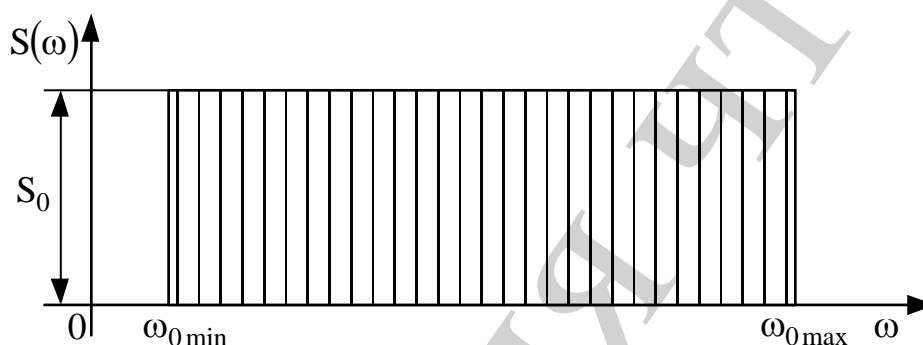


Рис. 3. Энергетически оптимальный амплитудный спектр  $S(\omega)$

Для получения функции  $P(t)$  воздействия, имеющей спектр (8), необходимо применить обратное преобразование Фурье (9) и соотношения (10) между тригонометрическими функциями и показательной функцией:

$$P(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cos \omega(t - \tau) d\tau. \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} e^{iz} &= \cos z + i \sin z; \\ \cos z &= \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}; \\ \sin z &= \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Задача обратного преобразования Фурье может быть достаточно просто решена с использованием средств вычислительной техники. Для работы с данной функцией необходимо предварительно преобразовать формулу (8), иллюстрирующую энергетически оптимальный амплитудный спектр (рис. 3).



Преобразование осуществляется с использованием единичной функции Хевисайда  $\square(t)$ , которая имеет преобразование Фурье  $\square\square\square(\square)\square i/\square$ , где  $\square(\square)$  – функция Дирака.  $\square(t)$  принимает значение 1 при  $t\square0$  и значение 0 при  $t<0$ . Энергетически оптимальный амплитудный спектр может быть реализован с использованием функции Хевисайда и теоремы запаздывания.

Полученная зависимость принимает вид (11), удобный для обработки на компьютере:

$$\begin{aligned} S(\omega) = & \frac{S_0}{2} \left( \Phi(-\omega + \omega_{0\max}) - \Phi(\omega - \omega_{0\max}) \right) - \\ & - \frac{S_0}{2} \left( \Phi(-\omega - \omega_{0\max}) - \Phi(\omega + \omega_{0\max}) \right) - \\ & - \frac{S_0}{2} \left( \Phi(-\omega + \omega_{0\min}) - \Phi(\omega - \omega_{0\min}) \right) + \\ & + \frac{S_0}{2} \left( \Phi(-\omega - \omega_{0\min}) - \Phi(\omega + \omega_{0\min}) \right). \end{aligned} \quad (11)$$

После применения обратного преобразования Фурье (9) в символьной форме получим выражение

$$P(t) = \frac{S_0}{2} \cdot \frac{i}{\pi} \cdot \frac{-e^{i\omega_{0\max}t} + e^{-i\omega_{0\max}t} + e^{i\omega_{0\min}t} - e^{-i\omega_{0\min}t}}{t}. \quad (12)$$

Используя формулы (10), зависимость (12) может быть преобразована к виду

$$P(t) = \frac{S_0}{\pi} \cdot \frac{\sin(\omega_{0\max}t) - \sin(\omega_{0\min}t)}{t}. \quad (13)$$

В точке  $t=0$  функция (13) имеет разрыв и должна быть доопределена следующим образом:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin(\omega_{0\max}t) - \sin(\omega_{0\min}t)}{t} = \omega_{0\max} - \omega_{0\min},$$

$$P(t) = \frac{S_0}{\pi} (\omega_{0\max} - \omega_{0\min}).$$

Окончательное выражение для силы, обеспечивающей оптимальный амплитудный спектр  $S(\square)$ , будет иметь вид

$$P(t) = \begin{cases} \frac{S_0}{\pi}(\omega_{0\max} - \omega_{0\min}), & \text{если } t = 0, \\ \frac{S_0}{\pi} \cdot \frac{\sin(\omega_{0\max} t) - \sin(\omega_{0\min} t)}{t}, & \text{если } t > 0. \end{cases} \quad (14)$$

Механическое воздействие импульсом вида (14) может быть реализовано с помощью электродинамического линейного двигателя возвратно-поступательного движения.

Надо отметить, что чем ближе друг к другу значения  $\omega_{0\max}$  и  $\omega_{0\min}$ , тем сложнее полигармоническое механическое воздействие, которое необходимо осуществить двигателю, следовательно, необходима более сложная и функциональная система управления.

Без снижения качества виброобработки закон  $P(t)$  можно упростить, приняв  $\omega_{0\min}=0$ . В этом случае обработка по-прежнему будет проведена на всех резонансных частотах и процесс несколько увеличится во времени, но алгоритмы управления существенно упростятся. Для иллюстрации данной идеи ниже приводятся зависимости  $P(t)$  при  $\omega_{0\min}=80$  рад/с,  $\omega_{0\max}=100$  рад/с и значении  $S(\omega)=4000$  Н (рис. 4) и такая же зависимость, но при  $\omega_{0\min}=0$  рад/с,  $\omega_{0\max}=100$  рад/с и значении  $S(\omega)=4000$  Н (рис. 5).

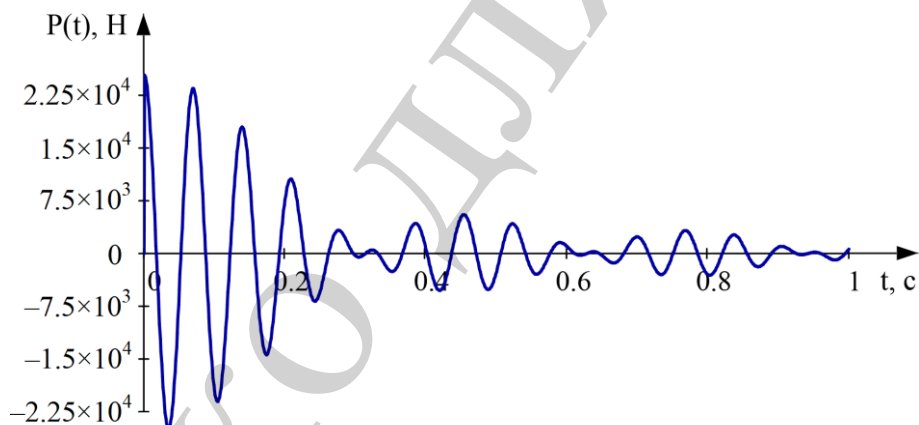


Рис. 4. Зависимость  $P(t)$  при  $\omega_{0\min}=80$  рад/с,  $\omega_{0\max}=100$  рад/с

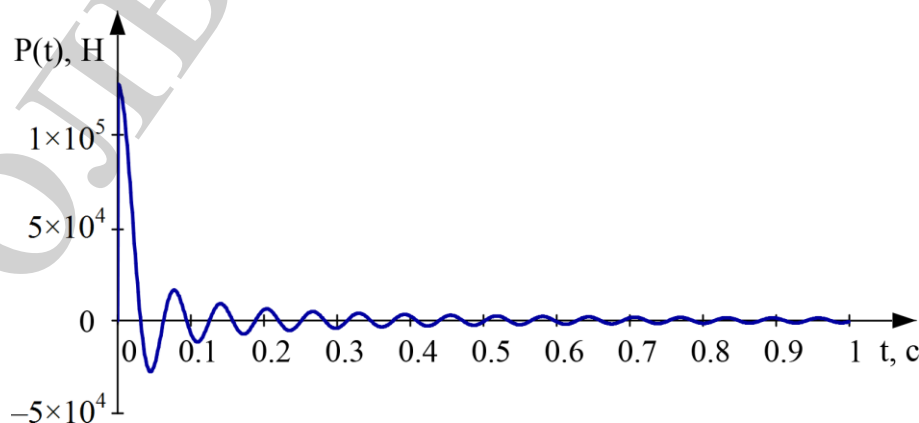


Рис. 5. Зависимость  $P(t)$  при  $\omega_{0\min}=0$  рад/с,  $\omega_{0\max}=100$  рад/с

В общем виде воздействие  $P(t)$ , имеющее спектр (11) при  $\omega_{0\min}=0$ , показано на рис. 6.

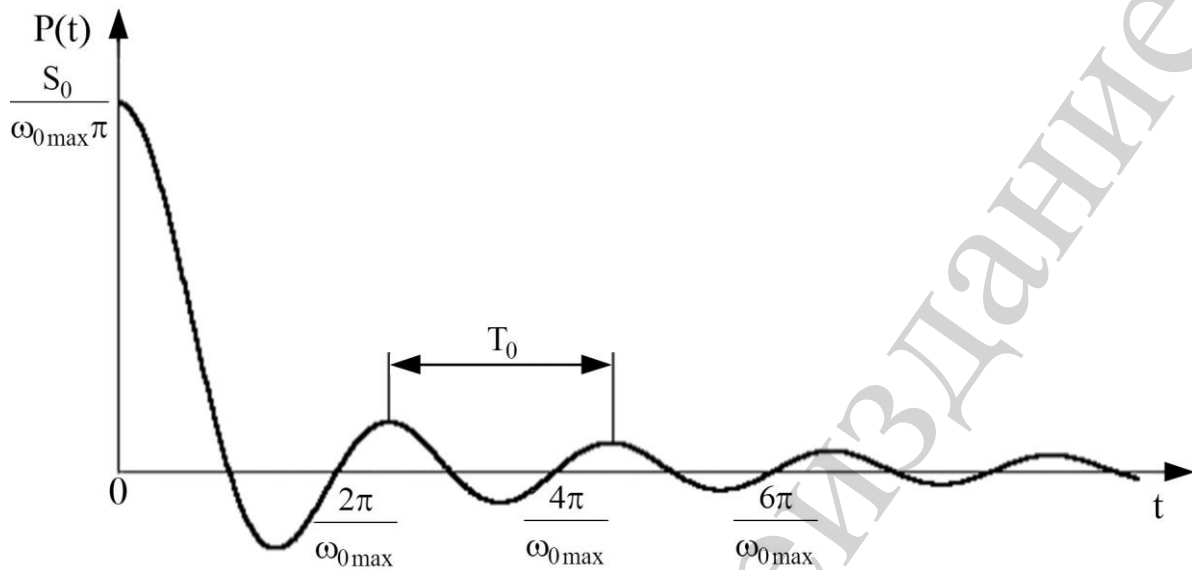


Рис. 6. График воздействия  $P(t)$ , имеющего оптимальный спектр при  $\omega_{0\min}=0$ , представленный в общем виде

Исходя из рис. 6, можно заключить, что предложенный энергоэффективный закон механического воздействия на металлические детали при осуществлении вибростабилизационной обработки предполагает использование суженной полосы резонансных частот. Как следствие, система управления и соответствующий исполнительный орган (вибродвигатель) должны иметь возможность для формирования полигармонического силового воздействия на деталь. Выполним оценку энергетических потерь при осуществлении такой обработки.

### 5. Оценка энергетических потерь, возникающих при осуществлении вибростабилизационной обработки полигармоническим механическим воздействием

Оценим энергетические потери при применении методики смещения  $\omega_{0\min}$  в нуль. Для упрощения расчёта будем считать, что КПД двигателя постоянен, т. е.  $\square A = \square W$  – изменение работы силы равно изменению затраченной на это изменение энергии. Элементарная работа  $\square A$  в прямоугольных декартовых координатах определяется по формуле

$$\delta A = F_x dx + F_y dy + F_z dz = (F_x \vartheta_x + F_y \vartheta_y + F_z \vartheta_z) dt, \quad (15)$$

где  $x, y, z$  – координаты точки приложения силы;  $F_x, F_y, F_z$  – проекции вектора силы на оси координат;  $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$  – проекции вектора скорости на оси

координат.

Полученная теоретическая зависимость  $P(t)$  является универсальной для виброобработки любой детали с любыми резонансными частотами.

В рассматриваемом случае сила действует только вдоль одной из осей, вдоль этой же оси направлена и скорость. Поэтому формула (15) примет вид

$$\delta A = F_z dz. \quad (16)$$

В простейшем случае при отсутствии демпфирования и упругих элементов уравнение (2) примет вид

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = P(t). \quad (17)$$

Из уравнения (17) путём двойного интегрирования найдём зависимость

$$z(t) = \frac{S_0}{\pi m} \cdot \left( t \cdot Si(\omega_{0\max} t) + \frac{1}{\omega_{0\max}} \cdot \cos(\omega_{0\max} t) \right) - \frac{S_0}{\pi m} \cdot \left( t \cdot Si(\omega_{0\min} t) + \frac{1}{\omega_{0\min}} \cdot \cos(\omega_{0\min} t) \right). \quad (18)$$

Определим дифференциал полученной функции

$$dz = \frac{S_0}{\pi m} \cdot (Si(\omega_{0\max} t) - Si(\omega_{0\min} t)) dt. \quad (19)$$

Далее, используя формулу (16), найдём зависимость (20), которая необходима для оценки снижения энергозатрат на вибростабилизационную обработку при сужении частотного диапазона, которое упрощает форму импульсов виброобработки:

$$A(t) = \int \frac{S_0^2}{\pi^2 m} \cdot \frac{\sin(\omega_{0\max} t) - \sin(\omega_{0\min} t)}{t} (Si(\omega_{0\max} t) - Si(\omega_{0\min} t)) dt = \frac{1}{m} \int (P(t) \int P(t) dt) dt. \quad (20)$$

Интеграл (20) не имеет аналитического решения. Его можно вычислить, пользуясь численными методами, для конкретных данных. Возьмём для примера два случая. В первом случае  $\omega_{0\min}=80$  рад/с,  $\omega_{0\max}=100$  рад/с,  $S(\omega)=4000$  Н, масса обрабатываемого изделия  $m=50$  кг, длительность импульса – 1 секунда (рис. 4). Значение  $A=19,072$  Дж. Во втором случае  $\omega_{0\min}=0$ ,

$\omega_{0\max}=100$  рад/с,  $S(\omega)=4000$  Н, масса обрабатываемого изделия  $m=50$  кг, длительность импульса – 1 с (рис. 5). Значение  $A=7,904 \cdot 10^4$  Дж. Таким образом, сужение частотного диапазона в 5 раз приводит к снижению энергетических затрат более, чем в 4000 раз.

Из этого можно сделать вывод, что при определении частотного спектра вибровоздействия необходимо учитывать затраты энергии в частотном диапазоне от 0 до  $\omega_{0\min}$ , поскольку неправильный выбор диапазона частот может привести к огромным энергетическим потерям.

На рис. 7 приведен график зависимости  $A(\omega_{0\min})$  для  $\omega_{0\max}=100$  рад/с,  $S(\omega)=4000$  Н, массы обрабатываемого изделия  $m=10$  кг, длительности импульса – 1 с и при воздействии импульсом с частотным спектром от 0 до  $\omega_{0\max}=100$  рад/с.

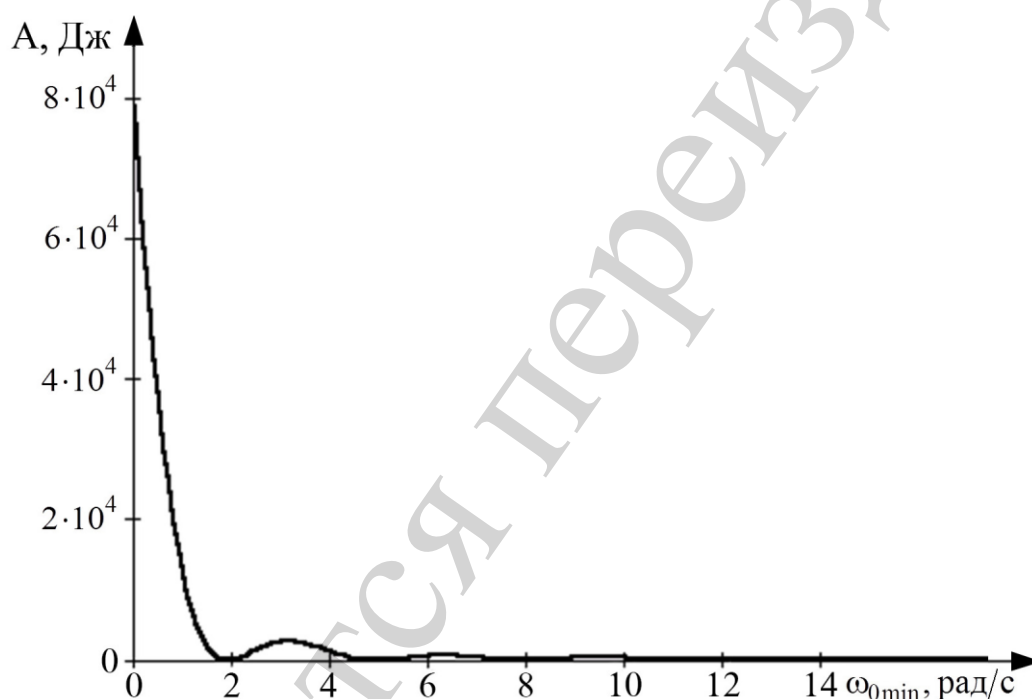


Рис. 7. Зависимость совершаемой работы от  $\omega_{0\min}$  для  $\omega_{0\max}=100$  рад/с,  $S(\omega)=4000$  Н,  $m=10$  кг, длительности импульса – 1 с ( $\omega_{0\min}$  изменяется от 0 до 15 рад/с)

Основной энергетический спектр (рис. 7) находится в диапазоне частот  $\Delta\omega=0-10$  рад/с, поэтому граничная частота  $\omega_{0\min}$  должна отстоять от нулевого значения как минимум на 10 рад/с, иначе энергетические потери значительно возрастают.

Работа, затрачиваемая на вибростабилизационную обработку (рис. 7 и рис. 8) при начальных частотах, близких к нулю, на два порядка выше работы, совершаемой при обработке с начальными частотами, отстоящими от 0 на 5–10 Гц.

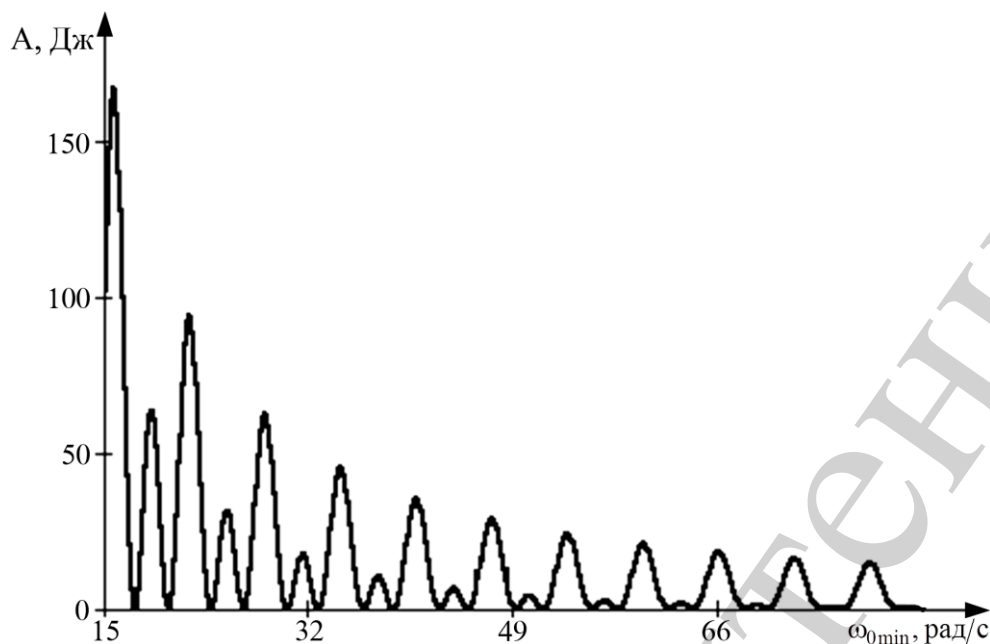


Рис. 8. Зависимость совершаемой работы от  $\omega_{0\min}$  для  $\omega_{0\max}=100$  рад/с,  $S(\omega)=4000$  Н,  $m=10$  кг, длительности импульса – 1 с ( $\omega_{0\min}$  изменяется от 15 до 100 рад/с)

Данное утверждение хорошо иллюстрирует зависимость, приведённая на рис. 9, которая построена в относительных единицах. Здесь по оси абсцисс откладывается отношение минимальной круговой частоты (переменной величины) к максимальной (величина постоянная – данное отношение представляет собой своего рода частотный диапазон обработки). По оси ординат откладывается значение совершаемой работы по отношению к максимальному ее значению, наблюдаемому при нулевом значении нижней границы частотного диапазона.

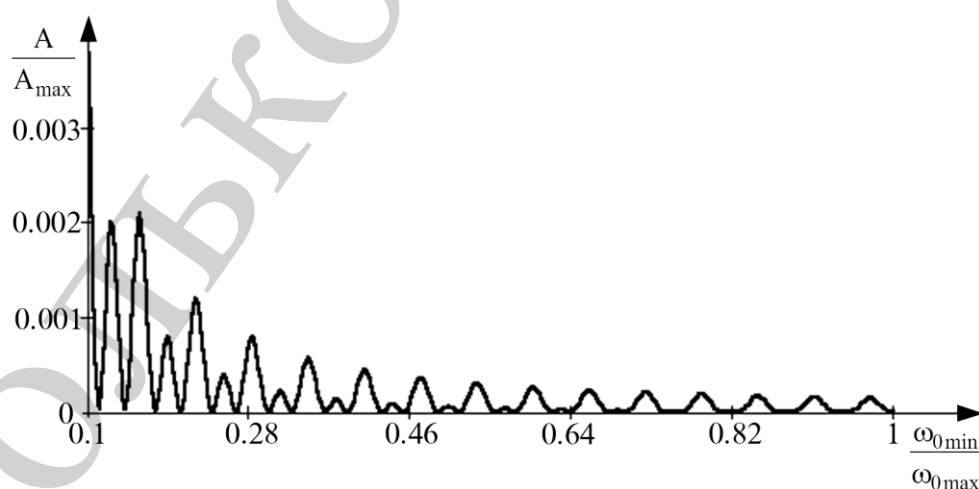


Рис. 9. Зависимость совершаемой работы от  $\omega_{0\min}$ , построенная в относительных единицах, длительности импульса – 1 с

Зависимость, представленная на рис. 9, является обобщающей и справедлива для любых числовых значений частотного диапазона на временном промежутке с длительностью импульса в 1 секунду.

Таким образом, при выборе оптимального механического воздействия вибростабилизирующей обработки металлических деталей возникает противоречие между шириной частотного диапазона и энергозатратами на обработку.

Использование широкого частотного диапазона имеет следующие достоинства:

- снижает время виброобработки и повышает её производительность за счет одновременного воздействия на всех резонансных частотах детали;
- нет необходимости следить за смещением каждой из резонансных частот в область низких, поскольку исходная полоса частот перекрывает весь возможный диапазон резонансных частот;
- позволяет упростить систему управления за счет использования достаточно простого алгоритма виброобработки.

Тем не менее, все достоинства широкополосной обработки меркнут при оценке величины непроизводительных энергозатрат, которые возникают при обработке на частотах, отличных от резонансных.

## **6. Выбор исполнительного органа для осуществления вибростабилизационной обработки**

Широко распространенные в промышленности асинхронные двигатели и двигатели постоянного тока не позволяют осуществлять полигармоническое силовое воздействие. Поэтому при создании электромеханической системы для технической реализации предложенного закона механического воздействия следует применять линейные электродвигатели возвратно-поступательного действия.

Основным преимуществом таких двигателей являются широкие функциональные возможности, поскольку их принцип работы основан на взаимодействии тока, протекающего по подвижному проводнику, с постоянным магнитным полем. При этом создаваемое вибровозбудителем усилие пропорционально току, подводимому к подвижному проводнику, и полностью повторяет его по форме.

Существуют следующие типы электродинамических линейных двигателей возвратно-поступательного движения:

- с одностержневым магнитопроводом;
- со сдвоенным магнитопроводом;
- с двойным зазором в магнитопроводе;
- с двухстержневым магнитопроводом.

Недостатком вибраторов с одностержневым магнитопроводом является сильное магнитное поле рассеяния, поэтому нужно применять специальные экраны, ослабляющие его действие. Весьма затруднительно создать конструкцию мощного двигателя по одностержневой схеме из-за чрезмерно большого диаметра подвижной катушки. Кроме того, увеличение размеров

катушки уменьшает жесткость конструкции, что является нежелательным фактором с технологической точки зрения. К недостаткам двигателей со сдвоенным магнитопроводом и с двойным зазором в магнитопроводе относится наличие напряженности магнитного поля в плоскости стола. Главным достоинством линейного двигателя с двухстержневым магнитопроводом является отсутствие необходимости в экранировании обрабатываемых изделий от полей рассеяния магнитного потока.

Схема электродинамического линейного двигателя возвратно-поступательного движения, предлагаемого для осуществления вибростабилизационной обработки, показана на рис. 10. Этот двигатель выполнен по двухстержневой схеме, его конструкция технологична, удобна в эксплуатации и имеет хорошую ремонтопригодность.

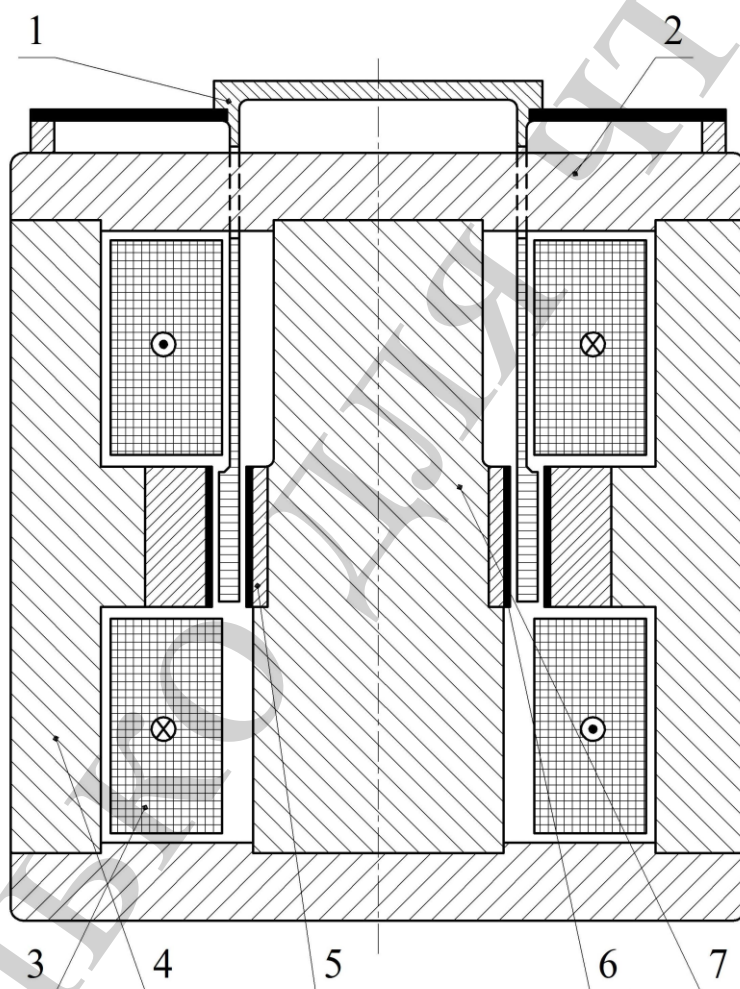


Рис. 10. Схема электродинамического линейного двигателя возвратно-поступательного движения: 1 – подвижная катушка; 2 – фланец магнитопровода; 3 – катушка подмагничивания; 4 – корпус магнитопровода; 5 – катушка управления; 6 – экран; 7 – стержень

Электромеханическая система с двигателем предложенной конструкции позволит снизить энергозатраты на осуществление вибростабилизационной обработки. Тем не менее, электродинамические линейные двигатели возвратно-



поступательного движения промышленностью серийно не выпускаются и изготавливаются только по индивидуальному заказу. Это может создать определенные сложности при внедрении предложенных решений в производство.

## **7. Обсуждение результатов исследования и рекомендации по их применению**

При воздействии на деталь механическими импульсами с частотным спектром, содержащим как резонансные, так и нерезонансные частоты детали, гармоники, частоты которых не относятся к резонансным, в процессе снятия внутренних напряжений не задействуются. Эффективно вибростабилизационная обработка ведется только на резонансных частотах.

Энергетическая эффективность определённого в работе закона механического воздействия при вибростабилизационной обработке металлических деталей объясняется сужением полосы низких частот до минимально необходимой.

Предложенное решение, в отличие от традиционной вибростабилизационной обработки, осуществляемой дебалансными электромеханическими системами, обладает рядом преимуществ. Среди них: отсутствие трудоемкого и длительного процесса поиска резонансных частот, снижение времени обработки и повышение ее производительности.

Предложенный закон формирования силового воздействия на деталь позволяет обеспечить полигармоническую возмущающую силу для одновременной обработки на нескольких резонансных частотах. За счет этого сохраняются все преимущества обработки сигналом со сплошной полосой частот.

Ограничением, характерным для предложенного закона механического воздействия при вибростабилизационной обработке, является тот факт, что он требует для своей технической реализации исполнительного органа (вибровозбудителя) специальной конструкции. В качестве такого исполнительного органа может выступать линейный электродвигатель возвратно-поступательного действия, принцип работы которого основан на взаимодействии тока, протекающего по подвижному проводнику, с постоянным магнитным полем. Создаваемое вибровозбудителем усилие пропорционально току, подводимому к подвижному проводнику, и полностью повторяет его по форме. Таким образом, сформировав необходимую полигармоническую зависимость тока от времени, можно получить желаемый закон вибростабилизационной обработки.

В качестве недостатка предложенного решения можно отметить необходимость осуществления периодического контроля величины диапазона  $\Delta\omega$  резонансных частот детали. Это приводит к необходимости использования микроконтроллерной или микропроцессорной системы управления и соответствующих датчиков. Однако определение  $\Delta\omega$  может осуществляться без прекращения обработки и не требует высокой точности. В перспективе, для деталей определенных классов могут быть созданы математические модели сокращения диапазона резонансных частот, а значит, отпадет необходимость в применении датчиков.

При технической реализации предложенного решения могут возникнуть трудности с сопряжением вибровозбудителя и системы управления электроприводом. Это связано с тем, что большинство современных систем управления электроприводами не имеет стандартных программных средств для формирования полигармонических управляющих воздействий.

Разработанная электромеханическая система может быть применена в машиностроении и приборостроении для вибростабилизационной обработки как крупногабаритных и массивных, так и мелких металлических деталей, с целью стабилизации их геометрических размеров и снижения остаточных напряжений. Применение предложенного способа вибростабилизационной обработки позволяет при сокращении количества частот в спектре сигнала вибровоздействия значительно сократить энергозатраты.

Дальнейшие перспективы исследований связаны с проектированием и изготовлением линейного двигателя возвратно-поступательного движения. Применение такого двигателя в качестве исполнительного органа в электромеханической системе лабораторного стенда позволит провести экспериментальные исследования и подтвердить энергетическую эффективность предложенных решений.

## **8. Выводы**

1. В результате выполненных исследований определён энергетически эффективный закон механического воздействия при вибростабилизационной обработке металлических деталей. Его особенностью является сужение полосы низких частот в процессе обработки до минимально необходимой.

2. В результате моделирования установлено, что сужение частотного диапазона в 5 раз приводит к снижению энергетических затрат более, чем в 4000 раз. Тем не менее, на практике сокращение энергетических затрат в значительной степени зависит от формы и габаритов обрабатываемой детали.

3. В качестве исполнительного органа электромеханической системы, осуществляющей вибростабилизационную обработку, выбран электродинамический линейный двигатель возвратно-поступательного движения. Двух-стержневая схема выполнения такого двигателя является конструктивно технологичной, удобной в эксплуатации и имеет хорошую ремонтпригодность.

## **Литература**

1. Withers P. J. Residual stress and its role in failure // Reports on Progress in Physics. 2007. Vol. 70, Issue 12. P. 2211–2264. doi: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/12/r04>
2. Schajer G. S. Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities // Experimental Mechanics. 2010. Vol. 50, Issue 8. P. 1117–1127. doi: <https://doi.org/10.1007/s11340-010-9386-7>
3. Radchenko V. P., Bochkova T. I., Tsvetkov V. V. Residual stresses relaxation in surface-hardened half-space under creep conditions // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys.

Math. Sci.]. 2015. Vol. 19, Issue 3. P. 504–522. doi: <https://doi.org/10.14498/vsgtu1428>

4. Walker C. A theoretical review of the operation of vibratory stress relief with particular reference to the stabilization of large-scale fabrications // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2011. Vol. 225, Issue 3. P. 195–204. doi: <https://doi.org/10.1177/0954420711402877>

5. The relationships between residual stress relaxation and texture development in AZ31 Mg alloys via the vibratory stress relief technique / Wang J.-S., Hsieh C.-C., Lai H.-H., Kuo C.-W., Wu P. T.-Y., Wu W. // Materials Characterization. 2015. Vol. 99. P. 248–253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.09.019>

6. Wang Y., Kramer M. S. Stress relief of mechanically roughened cylinder bores for reduced cracking tendency: Pat. No. US9863030B2. 2018. URL: <https://patents.justia.com/patent/9863030>

7. Zhao X., Zhang N., Wang A. Modeling and Simulation Technology of High Frequency Vibratory Stress Relief Treatment for Complex Thin -Walled Workpiece // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 206. P. 04001. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820604001>

8. Vukojevic N., Hadžikadunić F. Experiences of application of vibratory residual stress relieving methodology on large welded constructions // Conference: COMETa 2012 – 1st International Scientific Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications, At BiH. 2012. P. 229–234.

9. Evolution of Microstructure and Residual Stress under Various Vibration Modes in 304 Stainless Steel Welds / Hsieh C.-C., Wang P.-S., Wang J.-S., Wu W. // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. P. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1155/2014/895790>

10. Simakov G. M., Topovskiy V. V. Dynamic modes of electromechanical unbalance vibration exciter with induction motor under vector control // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/apeie.2016.7807065>

11. Лащенко Г. И. Технологические возможности вибрационной обработки сварных конструкций (Обзор) // Автоматическая сварка. 2016. № 7. С. 28–34.